

# 縦補剛材を有する鋼製円筒シェルの繰り返し実験

小牧 理\*, 井浦雅司\*\*, 熊谷洋司\*\*\*

\* 東京電機大学大学院理工学研究科 (350-03 埼玉県比企郡鳩山町)

\*\* 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (350-03 埼玉県比企郡鳩山町)

\*\*\* 工修 三菱重工(株)横浜製作所 (231 横浜市中区錦町12)

地震時における橋脚の挙動を明確にするために、これまでも多くの実験が報告されている。これまで著者らは、軸力と繰り返し横力を受ける鋼製円筒シェルの実験を実施し、基礎的なデータを収集してきた。ここでは、縦補剛材の評価方法、最高荷重の評価方法、靱性率の評価方法について、既往の実験結果を基に考察する。

Key Words: Cylindrical shell, Ductility, Cyclic loads

## 1. はじめに

軸力と繰り返し横力を受ける円形鋼製橋脚の実験的研究は、箱型断面に比べその数は少ないものの徐々に増加している。これまで報告されている実験的研究としては、文献[1]から文献[7]などが挙げられ、今後も各研究機関において行われそうである。各々の研究機関における研究の目的は必ずしも一致しているわけではなく、阪神・淡路大震災の被害を教訓として、既成の橋脚をどのように補修するかという目的から、円形鋼製橋脚の挙動を把握するというより基礎的な目的まで、様々である。本報告では、著者らが文献[7]に報告した実験結果を基にして、今後の鋼製円筒橋脚の設計に役立つであろう、縦補剛材の評価方法、最高荷重の評価方法、靱性率の評価方法について考察する。

既往の実験においては、縦補剛材を有する円筒シェルの実験は少なく、これは既往の実構造物において縦補剛材があまり挿入されていないという理由かとされる。しかしながら、靱性の確保を考えた時、その対策としては、板厚の増加あるいは補剛材の添付などが考えられる。従来の矩形断面鋼製橋脚を見ると、縦補剛材は多く用いられており、円形鋼製橋脚に使用しない理由は見当たらない。そこで著者らは、縦補剛材を有する円筒シェルの実験を行いその効果を調べた。そして、縦補剛材の効果を等価板厚として評価することの妥当性について考察した。本報告では、縦補剛材の効果をどのように評価するかについて、再度、考察することとする。

円形鋼製橋脚の最高荷重を知ることは、実構造物の設計において重要なことである。軸力のみ載荷される場合については、これまでも多くの研究があり、ある程度まではその挙動は解明されている。一方、本報告で対象としているような荷重条件においては、軸力比・繰り返し回数などの影響により、荷重・変位曲線は変化する。しかしながら、最高荷重については、軸力比や繰り返し回数などの影響はそれ程大きくないことが報告されている(文献[8])。本報告では、文献[7]において提案されている最高荷重を評価する方法について再度考察し、他のパラメータを用い時との比較を行うこととする。

地震荷重を受けた際に、靱性の高い構造形式であればより被害が少ないことが期待される。これまで、鋼製橋脚に関しては靱性率(塑性率)の定義は必ずしも確立されておらず、様々な定義が提案されている。ここでは、最高荷重に対応する変位と降伏変位に対応する変位の比を靱性率と考え、この靱性率を評価する方法について、既往の実験結果を基礎に議論する。なお、その際に、文献[10]において新たな靱性率が定義されており、それについても考察を加えることとする。

## 2. 既往の実験結果

著者らは縦補剛材を有する円筒シェルの繰り返し実験を実施し、文献[7]においてそれらの実験結果を報告している。実験は一定の軸力(降伏応力の15%)を載荷させ、横力を降伏変位を基準として正負交番1回繰り返して増加させる方法である。縦補剛材の本数は0, 3, 4本であり、シェル板厚は公称で3.2mm, 4.5mm, 6.0mmの3種類である。縦補剛材の板厚はシェル板厚と同一である。ここでは、最高荷重と靱性率に与える縦補剛材の影響について調べる。

まず、図-1にシェル板厚が3.2mmにおける荷重Pとシェル先端における横方向変位 $\delta$ の包絡線を示す。なお、縦補剛材の高さは52mmであり、図中の $P_y$ は計算による降伏荷重を、 $\delta_y$ は計算による降伏変位を示している。次に、シェル板厚が6.0mmの結果を図-2に示すが、縦補剛材の高さは52mmである。板厚が4.5mmの結果は図-2と同様の傾向にある。図-1より、板厚が3.2mmの場合、最高荷重に与える縦補剛材の影響は大きくないことがわかる。一方、最高荷重を通過した後の劣化領域においては縦補剛材の影響は見られる。板厚が6.0mmの場合、最高荷重および劣化領域の双方において縦補剛材は有効に働いていることが確認できる。板厚が3.2mmと6.0mmとで縦補剛材の影響が若干異なる原因として、座屈パターンの影響が考えられる。すなわち、板厚6.0mmも場合は、象の脚座屈が観察されているが、板厚3.2mmではダイヤモンド座屈が多く観察されており、ダイヤモンド座屈の場合、縦補剛材は最高荷重まで

はそれほど有効に働かないものと想像される。

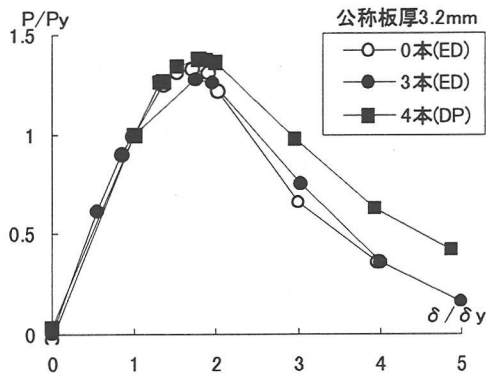


図-1 包絡線 (公称板厚 3.2mm)

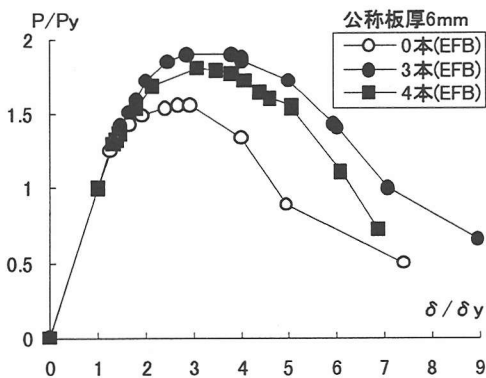


図-2 包絡線 (公称板厚 6.0mm)

次に、靱性率に与える縦補剛材の影響を調べる。図-3 は靱性率  $\mu_n$  と無次元径厚比  $R_t$  との関係を示しており、ここで靱性率  $\mu_n$  は最高荷重を越えた後に  $P_y$  に相当する変位を降伏変位で無次元化した値である。図-3 より、縦補剛材の本数の増加が必ずしも靱性率の増加に結びついてはいないものの、縦補剛材を入れることにより靱性が増加することが確認できる。

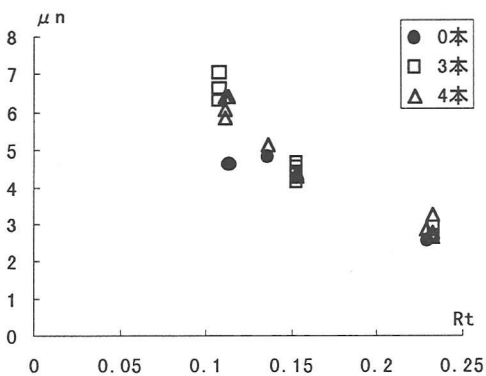


図-3 靱性率

最後に図-4, 5 に本実験結果において観察された代表的な座屈パターンを示す。図-4 はこれまでも多く報告されている象の座屈

脚座屈であり、図-5 は軸圧縮座屈において多く観察されるダイヤモンドパターンである。

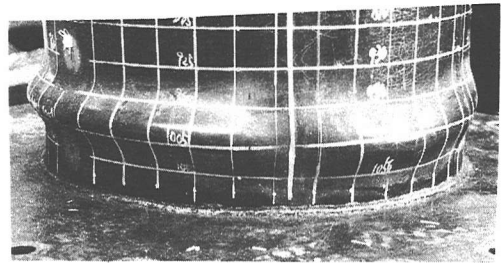


図-4 象の脚座屈

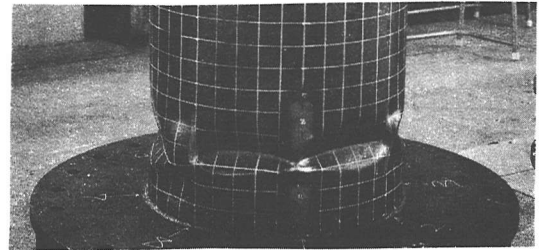


図-5 ダイヤモンド座屈

### 3. 縦補剛材の評価

設計においては縦補剛材をどのように評価するかは重要な問題である。文献[7]においては等価面積の考え方をを用いて(9)、縦補剛材を換算板厚に還元している。すなわち、次式を用いて換算板厚を決めている。

$$t^* = t + \frac{nAr}{2\pi R} \quad (1)$$

この妥当性を示すために、図-6 に補剛材を 4 本有する円筒シェルと、4 本の縦補剛材を換算板厚に還元した無補剛の円筒シェルの数値計算結果を示す。計算は ABAQUS を用いており、硬化則としては移動硬化則を採用した。図-6 からわかるように、補剛断面と無補剛断面とは大きな差異は見られず、等価面積の考え方は妥当であることがわかる。

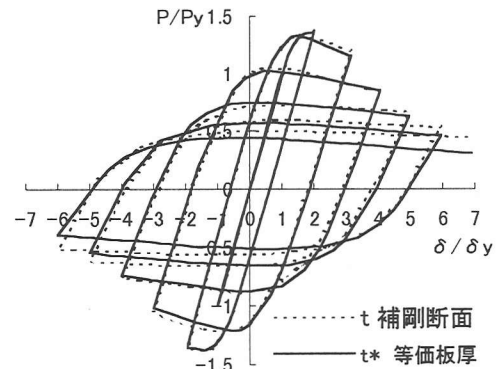


図-6 履歴曲線

なお、換算板厚の評価方法として、次式に示すように、断面2次モーメントが等価となるように板厚を決定する方法も考えられる。

$$t_i^* = \frac{D - \sqrt{\frac{64 \cdot I}{\pi} - D^4}}{2} \quad (2)$$

表-1は断面2次モーメントが等しくなるように換算板厚を決定した場合と、等価面積により換算板厚を決定した場合の結果を比較している。これより、両者における換算板厚の差異はそれほど大きくなく、本実験の範囲内においては比較的簡単な等価面積の考え方を採用する方が有利であることがわかる。

表-1 等価板厚

供試体 No.	等価板厚 (cm)		$\left  \frac{t_i^* - t_i}{t_i^*} \right  \times 100$ (%)
	式(1) $t_i^*$	式(2) $t_i$	
1	0.479	0.471	1.53
2	0.465	0.462	0.67
3	0.457	0.456	0.34
4	0.635	0.626	1.47
5	0.617	0.613	0.63
6	0.607	0.605	0.31
7	0.338	0.333	1.58
8	0.328	0.326	0.71
9	0.323	0.322	0.36
13	0.492	0.482	1.99
14	0.475	0.471	0.89
15	0.465	0.463	0.46
16	0.650	0.638	1.91
17	0.629	0.624	0.83
18	0.616	0.614	0.42
19	0.349	0.342	2.05
20	0.336	0.333	0.93
21	0.329	0.328	0.49
22	0.480	0.472	1.53
23	0.479	0.471	1.53
24	0.478	0.471	1.53
25	0.654	0.641	1.91
26	0.493	0.483	1.99
27	0.349	0.342	2.05
28	0.336	0.333	0.82
29	0.351	0.346	1.35
30	0.358	0.352	1.81
31	0.662	0.640	3.35
32	0.661	0.647	2.12
33	0.662	0.652	1.50

#### 4. 最高強度

円形鋼製橋脚の最高強度を推定することは、耐震設計において重要なことである。文献[7]においては、最高強度を推定する方法としてパラメータ  $P_i$  と  $R_t^*$  を用いている。本パラメータを用いて整理した結果を図-7に再度示す。既往の実験結果もほぼ一つの曲線に乗っていることがわかる。今後、同様な実験および解析結果が得られるものと思われるが、これらの結果を用いて本パラメータの有効性を検証していきたいと考えている。

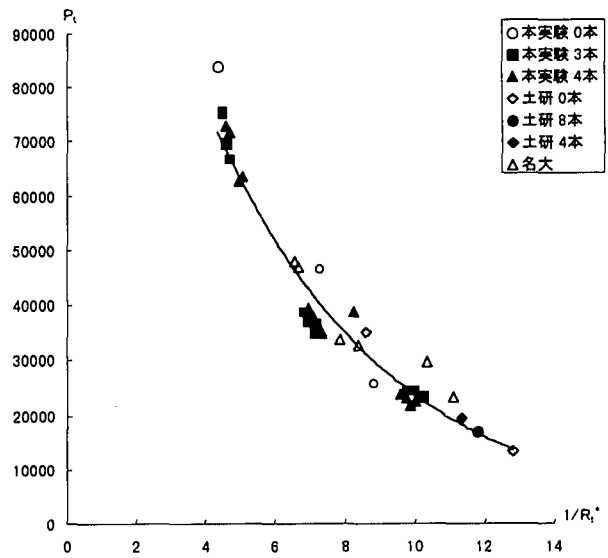


図-7 最高荷重

#### 5. 靱性率

靱性率の定義は多くの研究者により提案されているものの、未だ確立されたものは存在しない。文献[9]においては、耐力が急激に低下し始める直前の変位を降伏変位で無次元化したものを靱性率と定義しており、それと無次元径厚比との関係を示し良好な関係が存在すると結論づけている。ここでは、上記で定義された、耐力が急激に低下し始める直前の変位を確定することがそれほど容易でないことから、最高荷重における変位を降伏変位で無次元化したものを靱性率とする。これは道路橋示方書・同解説(V 耐震設計編)([11])におけるタイプIの地震動に対する許容変位に相当するものである。

さて、ここで用いる靱性率と無次元径厚比との関係を示したのが図-8である。横軸の  $R_t^*$  はリブの影響を等価面積により考慮した無次元径厚比である。これより、各試験機関における実験結果はそれぞれある範囲内にあることが確認できるものの、全体としては幅広い範囲に実験結果が分散していることがわかる。

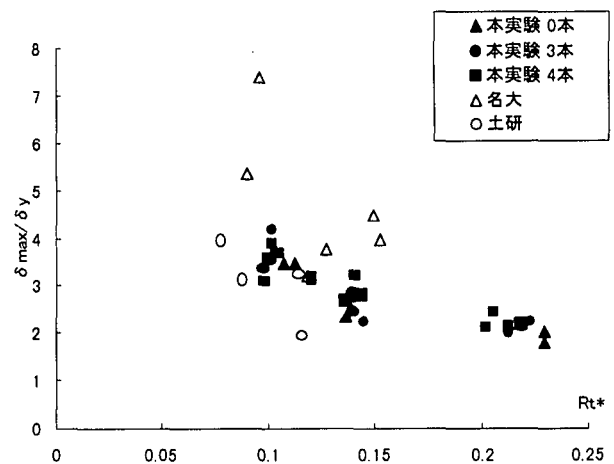


図-8 靱性率

次に、ここで用いる靱性率と最高荷重との関係を示したのが

図-9 である。ここで、本実験は両振り実験であることから最高荷重は上下の2点で得られ、その平均をとった荷重が  $P_{ave}$  であり、これを降伏横荷重  $P_y$  で無次元化した量を縦軸にとっている。図-8と図-9を比較すると、図-9の方が多くの実験結果が狭い範囲に分布していることが確認される。これより、本報告の靱性率を用いる場合は図-9におけるように、無次元径厚比よりも無次元最高荷重により靱性率を整理した方が有効であることがわかる。なお、他機関の実験結果には鋼種が異なるものも含まれており、鋼材別に区別すべきかどうかは今後の課題である。

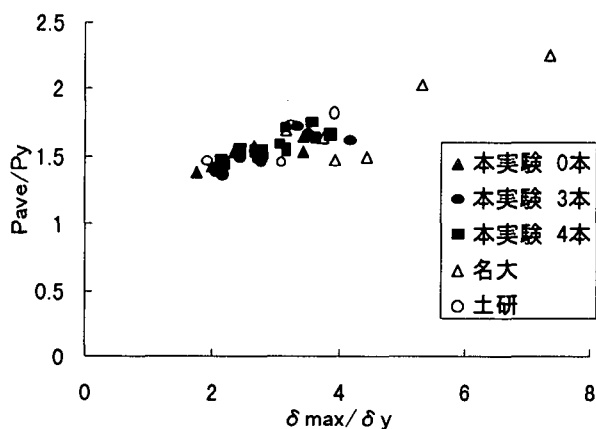


図-9 靱性率

## 6. おわりに

本報告では、既往の著者らの実験結果と他機関における実験結果を用いて、縦補剛材の効果・最高荷重の評価・靱性率の評価等について検討した。縦補剛材は、一般に、最高強度を増加させるばかりでなく靱性率を高める為にも有効であることが確認された。しかしながら、座屈パターンによりそれ程有効に働かない場合もあり注意を要する。縦補剛材をどのように評価するかについては、縦補剛材本数が多い場合は別とし、文献[7]の実験範囲内では等価板厚で良いことが数値計算より明かとなった。靱性率については、道路橋示方書・同解説におけるタイプIの地震動に対する許容変位を基準とした場合は、無次元径厚比で整理するよりは無次元最高荷重で整理した方が良いことを示した。これらの結果は今後も行われるであろう他機関の実験結果等を参考とし、さらに検討・修正を加えていきたい。

## EXPERIMENTAL WORK ON STIFFENED STEEL CYLINDRICAL SHELLS SUBJECTED TO CYCLIC LATERAL LOAD

Osamu KOMAKI, Masashi IURA and Yoji KUMAGAI

There have been a lot of experimental works on steel bridge piers. The dynamic behavior of steel bridge piers subjected to earthquake loads has been fundamental issue of those studies. Tests of cylindrical shells subjected to cyclic lateral loads have been performed by the authors to obtain the fundamental data of the shell. We study in this paper on the way to evaluate the effects of longitudinal stiffeners, to predict the maximum load and the ductility of the shell.

## 7. 参考文献

- 1) 西川和廣, 山本悟司, 上仙 靖, 安波博道, 名取 暢: 鋼製橋脚の耐震補強に関する実験, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.583-590, 1996.
- 2) 太田雅夫, 渡辺英一, 古田 均, 杉浦邦征, 宇都宮智昭, 南荘 淳, 山口 岳: 円形断面橋脚柱の強度・変形性能に関する実験的研究, 土木学会第48回年次学術講演会, 第I部門, pp.196-197, 1993.
- 3) 水谷慎吾, 宇佐美勉, 青木徹彦, 伊藤義人, 岡本隆: パイプ断面鋼圧縮部材の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.105-114, 1996.
- 4) 本間宏二, 三木千壽, 館石和雄, 穴見健吾, 佐々木哲也: 断面変化のある鋼管柱の繰返し水平載荷実験, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.355-358, 1996.
- 5) 森忠彦, 安波博道, 富永知徳: 繰返し水平力を受ける鋼管柱の変形性能に関する実験的研究, 土木学会第50回年次学術講演会, 平成7年9月.
- 6) 山田将樹, 青木徹彦, 安波博道: 円形鋼管部材の繰返し載荷耐震実験, 土木学会第51回年次学術講演会, 平成8年9月.
- 7) 井浦雅司, 熊谷洋司, 小牧理: 横力と一定軸力を受ける円筒シェルの終局状態に関する研究, 土木学会論文集, No.556/I-38, pp.107-118, 1997.
- 8) 鈴木森晶, 宇佐美勉: 繰返し荷重下における鋼製橋脚モデルの強度と変形能の推定式に関する研究, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.115-125, 1995.
- 9) Jones, N. and Papageorgiou, E.A.: Dynamic axial plastic buckling of stringer stiffened cylindrical shells, J. Mech. Engng Sci. 5, 23, pp.1-20, 1963.
- 10) 上仙 靖, 他: 円形断面鋼製橋脚の隙間あけ鋼管巻立て補強に関する実験的検討, 土木学会第51回年次学術講演会, 平成8年9月.
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(V 耐震設計編), 平成8年12月.

(1997年3月31日受付)